

О СКАЧКООБРАЗНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ТРЕЩИНЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФТОРИСТОГО ЛИТИЯ

А. М. Михайлов

(Новосибирск)

Одной из основных задач, возникающих при изучении разрушения, является задача о взаимодействии процессов разрушения и пластической деформации. В последние годы появился ряд работ, посвященных взаимодействию трещины с дислокациями. В работе [1] Д. Гилманом было показано, что трещина, медленно движущаяся в кристаллах фтористого лития, порождает вблизи своего конца дислокационные петли. В работе [2] была обнаружена связь этого явления со скачкообразным распространением трещины во фтористом литии. Скачкообразное движение трещины в щелочно-галогидных кристаллах наблюдали М. П. Шаскольская, Ван Янь-вэнь и Гу Шу-чжао [3], а в монокристаллах висмута — В. И. Косевич [4] и В. М. Финкель, А. И. Куткин, А. М. Савельев, В. А. Зрайченко, Л. Б. Зуев и В. К. Косицина [5]. Авторы работы [2] объяснили это явление возникновением автоколебаний в системе клин — тело с трещиной. На основе этого объяснения в работах [6,7] была развита теория автоколебаний при расклинивании хрупких тел, которая дает возможность в определенных условиях определить из опыта отношение удельных поверхностных энергий разрушения для неподвижной и движущейся трещины. Ниже приводятся некоторые результаты экспериментов в этом направлении.

Описание эксперимента. Материалом для исследования служили монокристаллы фтористого лития. Было проведено определение механических свойств кристаллов в условиях сжатия при комнатной температуре.

Сжатие проводилось на машине Г. А. Дубова — В. Р. Регеля [8] вдоль направлений [100] со скоростью $0.4 \cdot 10^{-5}$ сек⁻¹.

Предел текучести оказался равным 340 г/мм², деформация, при которой началось образование видимых глазом трещин, равнялась примерно 2%. При попытке деформировать кристаллы со скоростью порядка 10^{-3} сек⁻¹ наблюдалось практически немедленное их растрескивание.

Образцы для расклинивания выкалывались по спайности и представляли собой прямоугольные параллелепипеды с размерами основания примерно 4×4 мм² и длиной около 50 мм. Легким ударом по долоту, острый край которого устанавливался вдоль средней линии основания, в образце создавалась начальная трещина, длина ее составляла обычно 15—20 мм. Образцы с трещиной нагревались с печью до 800° С, выдерживались при этой температуре 5 час и охлаждались с печью. После отжига при просмотре образцов в скрещенных николях на поляризационном микроскопе не было обнаружено никакого двойного лучепреломления. Плотность дислокаций в отожженных кристаллах составляла примерно $3 \cdot 10^4$ см⁻² (без учета дислокаций, содержащихся в границах блоков).

Выявление дислокаций проводилось методом избирательного травления (10^{-4} -молярный раствор хлорного железа в воде [9]).

Образцы подвергались расклиниванию клином постоянной толщины, движущимся с постоянной скоростью. Клином служило лезвие безопасной бритвы толщиной 0.1 мм. Скорости расклинивания, т. е. скорости движения клина относительно образца, составляли 0.007, 0.07, 0.7, 20, 40, 490 и 960 мм/сек.

Регистрация распространения трещины осуществлялась при помощи кинокамер типа ПСК-24 и СКС-1М в зависимости от скорости расклинивания. Изображение трещины проектировалось на киноплёнку оптической системой, способной давать увеличение или уменьшение в несколько раз. Применялась схема расклинивания с неподвижным относительно кинокамеры клином и движущимся образцом. Это способствовало нахождению конца трещины в поле зрения кинокамеры. Скорость съемки составляла 1—4000 кадров в секунду в зависимости от скорости расклинивания. В некоторых случаях съемка велась камерой СКС-1М с удаленной компенсационной призмой в режиме фоторегистрации [10]. Съемка в режиме фоторегистрации позволила увеличить разрешающую способность во времени, которая при этом достигла 10 мксек. При таком способе съемки изображение трещины проектировалось на непрерывно

движущуюся пленку без оптической компенсации сдвига изображения, причем трещина и пленка двигались перпендикулярно одна к другой. В результате на пленке получалась зависимость координаты конца трещины от времени (фиг. 1).



Фиг. 1

После расклинивания одна из половинок образца при помощи долота резко раскалывалась пополам по плоскости, параллельной длинной стороне образца и перпендикулярной плоскости расклинивания. На получившейся «четвертушке» вытраивались дислокации, и их распределение изучалось при помощи металлографического микроскопа на плоскости расклинивания и на плоскости, ей перпендикулярной. Всего было исследовано около ста образцов.

Результаты и их обсуждение. Изучение движения конца трещины показало, что трещина распространяется скачками. В течение некоторого времени конец трещины остается на месте, а затем перемещается в другое положение за много меньший отрезок времени.

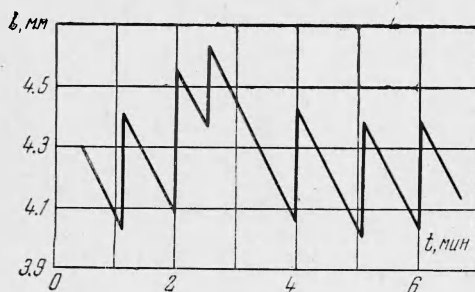
Рассмотрим имеющееся объяснение скачкообразного распространения трещины [2, 6, 7]. Согласно теории квазихрупкого разрушения, при расклинивании тонкой полосы ширины b из однородного изотропного упругого материала с модулем Юнга E жестким клином толщины h имеет место соотношение

$$l_0^4 = \frac{3Eh^2b^3}{64T(0)} \quad (1)$$

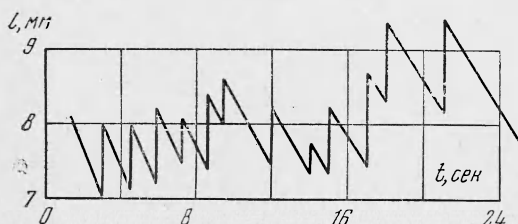
Здесь l_0 — длина неподвижной равновесной трещины перед клином, $T(0)$ — плотность поверхностной энергии разрушения для неподвижной трещины. Из допущения, что плотность поверхностной энергии разрушения является убывающей функцией скорости движения конца трещины и в пренебрежении свойством инерции материала полосы следует вывод, что, начав двигаться, конец трещины мгновенно перейдет в другое положение такое, что

$$(l_0 + \Delta l)^4 = \frac{3Eh^2b^3}{64T(v_*)}$$

где Δl — длина скачка, $T(v_*)$ — плотность поверхностной энергии разрушения для трещины, движущейся со скоростью v_* , а v_* — такая скорость, при которой плотность поверхностной энергии разрушения минимальна. После этого конец трещины



Фиг. 2



Фиг. 3

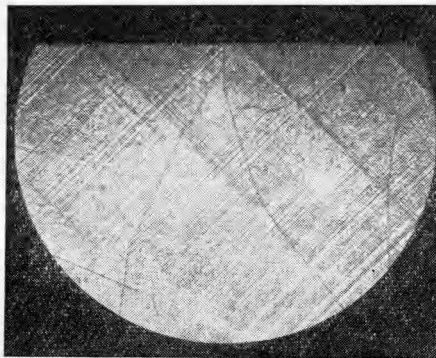
будет оставаться на месте до тех пор, пока клин вновь не приблизится на расстояние l_0 . Отсюда

$$\frac{T(0)}{T(v_*)} = \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)^4 \quad (2)$$

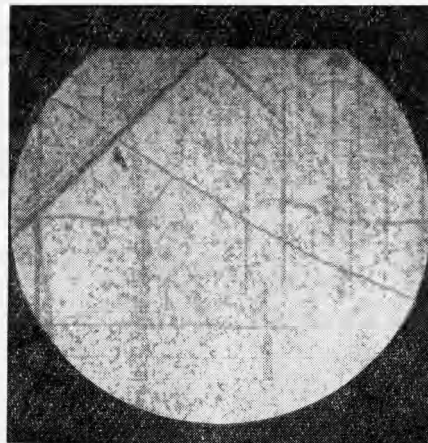
Необходимым следствием такого объяснения является вывод, что трещина в среднем движется со скоростью клина; при этом график зависимости длины трещины от времени должен иметь вид периодической кривой, состоящей из последовательности треугольных импульсов, следующих непосредственно один за другим, причем передний фронт импульса является вертикальной прямой.

Примерно такое поведение трещины обнаруживается при расклинивании со скоростями 0.007, 0.07 и 0.7 м.м/сек. На фиг. 2 и 3 приведены графики зависимости длины трещины от времени для образцов, расклинивавшихся со скоростями 0.007 и 0.7 м.м/сек соответственно. На фиг. 4 и 5 приведены соответствующие микрофотографии плос-

кости ($\times 70$), перпендикулярной плоскости расклинивания, для этих образцов. Видно, что из мест остановки трещины развились полосы скольжения, причем в первом случае скольжение распространилось на область, простирающуюся на расстояние большее, чем расстояние между скачками; следовательно, после прохождения трещины через весь образец он оказывается пластически деформированным. Во втором случае пластическая деформация остается локализованной в двух плоскостях скольжения.



Фиг. 4



Фиг. 5

При скорости расклинивания 0.07 мм/сек распределение скольжения имеет промежуточный между этими случаями характер.

Таким образом, по мере движения клина происходит пластическая деформация образца. Пусть в момент времени t длина трещины перед клином равна l ; тогда деформация материала, лежащего по одну сторону от трещины, составит на участке между клином и концом трещины $h/2l$ (h — толщина клина). В момент времени t_1 деформация будет равняться $h/2l_1$, где l_1 — длина трещины в момент t_1 . Средняя скорость деформации за время $t_1 - t$ будет равна

$$\frac{h}{2} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l} \right) \frac{1}{t_1 - t}$$

а при $t_1 \rightarrow t$ это выражение перейдет в

$$\frac{h}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{l} \right) = \frac{h}{2} \left(-\frac{1}{l^2} \right) \frac{dl}{dt} = \frac{h}{2} \left(-\frac{1}{l^2} \right) V \quad (3)$$

где V — скорость расклинивания. Подставив в (3) значения $h = 0.1 \text{ мм}$, $V = 0.007 \text{ мм/сек}$, $l = 4 \text{ мм}$, получим скорость деформации $2.2 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$. При скорости расклинивания 0.7 мм/сек скорость деформации имеет величину порядка 10^{-3} сек^{-1} . Таким образом, при скорости деформации около 10^{-5} сек^{-1} полосы скольжения расширяются до тех пор, пока упрочнение не остановит этот процесс. Это происходит при деформации порядка $h = 2l_0 = 1.25\%$. Повышение скорости деформации до 10^{-3} сек^{-1} исключает этот процесс, и трещина начинает распространяться раньше, чем полосы скольжения значительно расширятся. Скорости деформации имеют тот же порядок величины, что и при испытании на сжатие. Следовательно, процесс развития полосы скольжения в ширину (многократное поперечное скольжение [11]) имеет свое характерное, не очень малое время. Сказать о нем что-либо более определенное на основании данных опытов нельзя, так как неизвестно касательное напряжение, действующее в полосе скольжения.

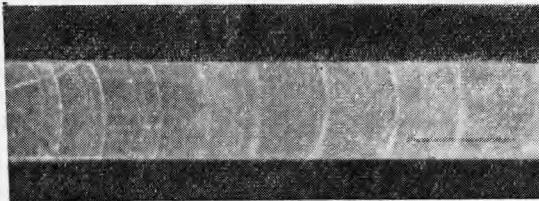
Наличие развитого пластического течения делает невозможным применение формулы (1) для определения $T(0)$, так как пластическая деформация влияет не только на напряжения в концевой области, но и уменьшает расклинивающую силу, с которой клин действует на образец [12], потому что смещения берегов трещины, вызванные клином, не являются чисто упругими. Поэтому величина h в формуле (1) становится неизвестной. Однако в (2) величина h исключена; пользуясь этим соотношением, можно найти отношение удельных поверхностных энергий разрушения для неподвижной и движущейся трещины $T(0)/T(v_*)$. Приводим средние значения длин скачков Δl

для всех применявшихся скоростей расклинивания V , а также средние значения длин трещины перед клином l_0 и значения отношения плотностей поверхностных энергий разрушения для неподвижной и движущейся трещины $T(0) / T(v_*)$ для некоторых скоростей расклинивания.

V	0.007	0.07	0.7	20	40	490	960	мм/сек
Δl	0.5	1.0	1.8	2.4	2.8	3.9	4.1	мм
l_0	4.3	6.0	8.0	—	—	—	—	мм
$T(0) / T(v_*)$	1.5	1.8	2.2	—	—	—	—	—

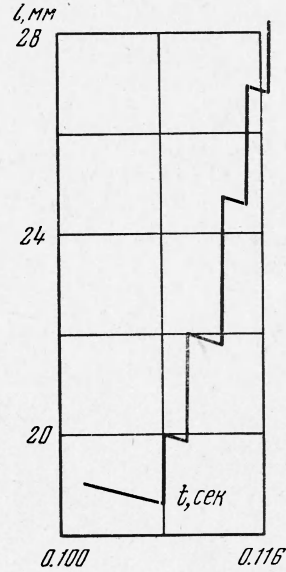
Таким образом, во фтористом литии плотность поверхностной энергии разрушения при наличии пластической деформации имеет тот же порядок величины, что и при отсутствии пластической деформации (т. е. во время перескока). Отметим, что по литературным данным в металлах эти величины отличаются на три порядка [13].

Начиная со скорости расклинивания 20 мм / сек, зависимость длины трещины от времени (фиг. 6) становится несовместимой с теорией квазихрупкого разрушения. Трещина распространяется скачками, причем средняя скорость ее распространения не равна скорости клина, а превышает ее в несколько раз (от трех до пятнадцати на различных образцах). Это непосредственно видно из фиг. 1, если вспомнить, что клин неподвижен относительно кинокамеры. Микрофотография ($\times 4$) плоскости расклинивания одного из образцов приведена на фиг. 7 (скорость расклинивания равнялась 40 мм / сек). Особенностью расклинивания с большими скоростями является наличие «скачков второго порядка», обнаруживаемых микроскопически. Примененная техника не позволила надежно интерпретировать эти «скачки»; однако в отдельных случаях результаты кино съемки в режиме фоторегистрации позволяют предположить, что «скачки первого порядка», т. е. те, о которых до сих пор шла речь, распадаются во времени на «скачки второго порядка». Петли дислокаций, соответствующие «скачкам второго порядка», расположены вблизи поверхности и, в отличие от скачков первого порядка, не образуют полос скольжения. Применение метода фоторегистрации позволило определить скорость перескока. Она оказалась равной 35—80 м / сек для разных скачков, что находится в хорошем соответствии с результатом работы [2], где для распространения трещины с образованием аналогичной микроструктуры была найдена другим методом величина скорости 60 м / сек. Погрешность определения скорости составляет ± 8 м / сек.



Фиг. 7

Описанный «отрыв» трещины от клина заставляет признать, что объяснение скачкообразного распространения трещины, приведенное в работе [2] и основанное на теории квазихрупкого разрушения, в данном случае недостаточно. Возможно, что такое поведение удастся объяснить при детальном рассмотрении структуры концевой зоны, т. е. при рассмотрении поведения трещины в поле напряжений дислокаций, порожденных ею же. При таком подходе источником силы, движущей трещину, будет не клин непосредственно, а вызванное им пластическое течение в конце трещины. Не существенность структуры концевой зоны имеет место тогда, когда поле напряжений, вызванное силами сцепления, практически исчезает на расстояниях, много меньших любого характерного размера задачи. В этом случае силы сцепления характеризуются интегральной величиной — поверхностной энергией [14]. Такое положение имеет место в случае сил сцепления молекулярной природы, быстро убывающих с расстоянием. При наличии пластической деформации дело может обстоять и не так. Хотя размеры области, охваченной пластическим течением, малы, сравнительно с длиной трещины, они как раз соизмеримы с величиной скачка. Отметим, что возможность порождения трещины дислокациями многократно обсуждалась теоретически, хотя и в применении к другим видам напряженного состояния [13].



Фиг. 6

Описанный «отрыв» трещины от клина заставляет признать, что объяснение скачкообразного распространения трещины, приведенное в работе [2] и основанное на теории квазихрупкого разрушения, в данном случае недостаточно. Возможно, что такое поведение удастся объяснить при детальном рассмотрении структуры концевой зоны, т. е. при рассмотрении поведения трещины в поле напряжений дислокаций, порожденных ею же. При таком подходе источником силы, движущей трещину, будет не клин непосредственно, а вызванное им пластическое течение в конце трещины. Не существенность структуры концевой зоны имеет место тогда, когда поле напряжений, вызванное силами сцепления, практически исчезает на расстояниях, много меньших любого характерного размера задачи. В этом случае силы сцепления характеризуются интегральной величиной — поверхностной энергией [14]. Такое положение имеет место в случае сил сцепления молекулярной природы, быстро убывающих с расстоянием. При наличии пластической деформации дело может обстоять и не так. Хотя размеры области, охваченной пластическим течением, малы, сравнительно с длиной трещины, они как раз соизмеримы с величиной скачка. Отметим, что возможность порождения трещины дислокациями многократно обсуждалась теоретически, хотя и в применении к другим видам напряженного состояния [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Gilman J. Nucleation of dislocation loops by cracks in crystals. Trans. Amer. Instn. Mining Metals Engng, 1957, vol. 209, p. 449.
2. Gilman J., Knudsen C., Walsh W. Cleavage cracks and dislocations in LiF crystals. J. Appl. Phys., 1958, vol. 29, No 4, p. 601.
3. Шаскольская М. П., Ван Янь-вэнь, Гу Шу-чжао. О возникновении дислокаций при распространении и слиянии трещин в ионных кристаллах. Кристаллография, 1961, т. 6, № 4, стр. 605.
4. Косевич В. М. Образование дислокаций при расколе кристалла висмута по плоскости спайности. Кристаллография, 1962, т. 7, № 1, стр. 97.
5. Финкель В. М., Куткин А. И., Савельев А. М., Зрайченко В. А., Зуев Л. В., Косицина В. К. Исследование кинетики роста трещин в монокристаллах висмута. Кристаллография, 1963, т. 8, № 5, стр. 752.
6. Баренблатт Г. И., Салганик Р. Л. О расклинивании хрупких тел. Автоколебания при расклинивании. ПММ, 1963, т. 27, вып. 3, стр. 436.
7. Баренблатт Г. И., Салганик Р. Л. Об автоколебаниях при расклинивании тонких тел. ПММ, 1963, т. 27, вып. 6, стр. 1075.
8. Регель В. Р., Дубов Г. А. Регистрирующий прибор для записи кривых сжатия, растяжения и релаксации. Бюл. «Приборы и стенды» Ин-та техн.-эконом. информ. АН СССР, 1956, № П — 56—452, тема 2.
9. Johnston W., Gilman J. Dislocations and mechanical properties of crystals. Ed. by Fisher, Wiley, N-Y, 1957, p. 116. (русс. перев.: Дислокации и механические свойства кристаллов. Изд. иностр. лит., 1960, стр. 82).
10. Лаврентьев В. И., Пелль В. Г. Скоростная киносъемка камерой СКС-1. Искусство, 1963.
11. Johnston W., Gilman J. Dislocation multiplication in lithium fluoride crystals. J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, No 4, p. 632.
12. Баренблатт Г. И., Черепанов Г. П. О расклинивании хрупких тел. ПММ, 1960, т. 24, вып. 4, стр. 667.
13. Cottrell A. Fracture. Ed. by Averbach, Wiley, N-Y, 1959, p. 20 (русс. перев.: Атомный механизм разрушения. Metallurgizdat, 1963, стр. 30).
14. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. ПМТФ, 1961, № 4, стр. 3.

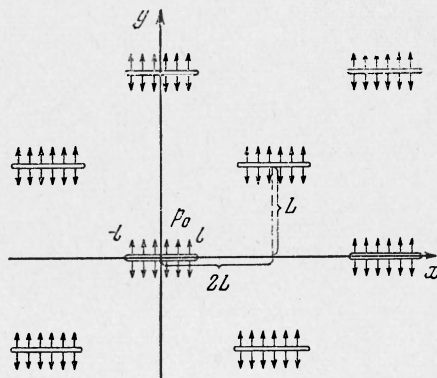
ОБ ОДНОЙ ОЦЕНКЕ ВЗАИМНОГО УПРОЧЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ИХ ШАХМАТНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ

В. З. Партон (Москва)

Реальные материалы содержат большое число микродефектов различного рода, развитие которых под действием приложенного поля напряжений приводит к появлению системы трещин. Характер взаимного влияния трещин в такой системе может быть весьма разнообразен; его исследование представляет значительный интерес. Я. Б. Зельдович обратил внимание на то, что при шахматном расположении трещин (упругая плоскость, ослабленная двоякопериодической системой трещин одинаковой длины) в определенных условиях должно наблюдаться их взаимное упрочнение.

В предлагаемой работе этот вопрос исследуется на основе численного решения задачи теории упругости в приближенной постановке; получено подтверждение справедливости этого предположения.

1. Рассмотрим двоякопериодическую систему трещин, длина каждой из которых $2L$. Пусть ω_1, ω_2 — основные периоды, D — область, занятая телом, $M_{kk'}$ — контур трещины с центром в точке $P = k\omega_1 + k'\omega_2$ ($k, k' = 0, \pm 1, \pm \dots$) (фиг. 1). Решетка симметрична относительно осей x и y , а каждая из трещин подвержена однородному растягивающему напряжению p_0 .



Фиг. 1

Решетка симметрична относительно осей x и y , а каждая из трещин подвержена однородному растягивающему напряжению p_0 .